

Ссылка на статью

// Машины и Установки: проектирование,  
разработка и эксплуатация.

МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Электрон. журн. 2015. № 04. С. 13–32.

DOI: [10.7463/aplts.0415.0802699](https://doi.org/10.7463/aplts.0415.0802699)

Представлена в редакцию: 03.07.2015

Исправлена: 29.07.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 629.13/539.37

## **Устойчивость и опрокидываемость свободно стоящего гидротанка: разработка опытовых бассейнов для испытания подводных роботов**

Северов С. П.<sup>1,\*</sup>

<sup>\*</sup>[sseverov@mail.ru](mailto:sseverov@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

. Проблемы опрокидываемости объекта, свободно опирающегося на основание под действием сил тяжести, упругости, трения и др. внешних нагрузок, имеют глобальное, непреходящее актуальное значение для инженерного строительства, для транспорта – авиационного, автомобильного, железнодорожного и др. Значительная часть исследований опрокидываемости свободно опирающихся объектов фрагментарно входят в различные предметные области технических приложений. В частности, это характерно для гидротанка – емкости типа оболочки, заполненной жидкостью. Проблемы с гидротанками – в множественности нелинейных структурных, геометрических и физических форм потери устойчивости. Целью настоящей работы является определение фазовых и критических параметров базовых тел простой формы с различной опорной поверхностью: куб; параллелепипед; цилиндр и др. с выливанием жидкости из оболочки или без. Анализ опрокидываемости гидротанка как твердого тела с жидкостью, в качестве первого приближения предшествует оценке устойчивости объекта как гидроупругой системы. Экспериментальные результаты подтверждают возможность разработки, изготовления и эксплуатации гидротанка рассматриваемого типа для испытаний подводных гидроботов

**Ключевые слова:** гидролоток, гидроколонна, гидростатика, гидротанк, гидротруба, гидроупругость, опрокидываемость, подводные испытания, подводный робот, устойчивость

---

### **Введение**

Новизну и актуальность проблем опрокидывания можно обосновать тем, что в сущности опрокидываемость – это распространенное явление природы и техносферы. Подобные явления можно наблюдать в естественной среде, на транспорте: в автомобиле, в железнодорожном вагоне, в самолете, в вертолете, на судах подводного и надводного морского флота и в других ситуациях. Это можно видеть, не замечая его системных закономерностей. В технике воспроизведение некоторых разновидностей динамического опрокидывания доведено до совершенства: «мертвая петля» мотоциклиста в цирковом аттракционе на твердой искусственной трассе; петля Нестерова на самолете; петля вертолета в воздухе

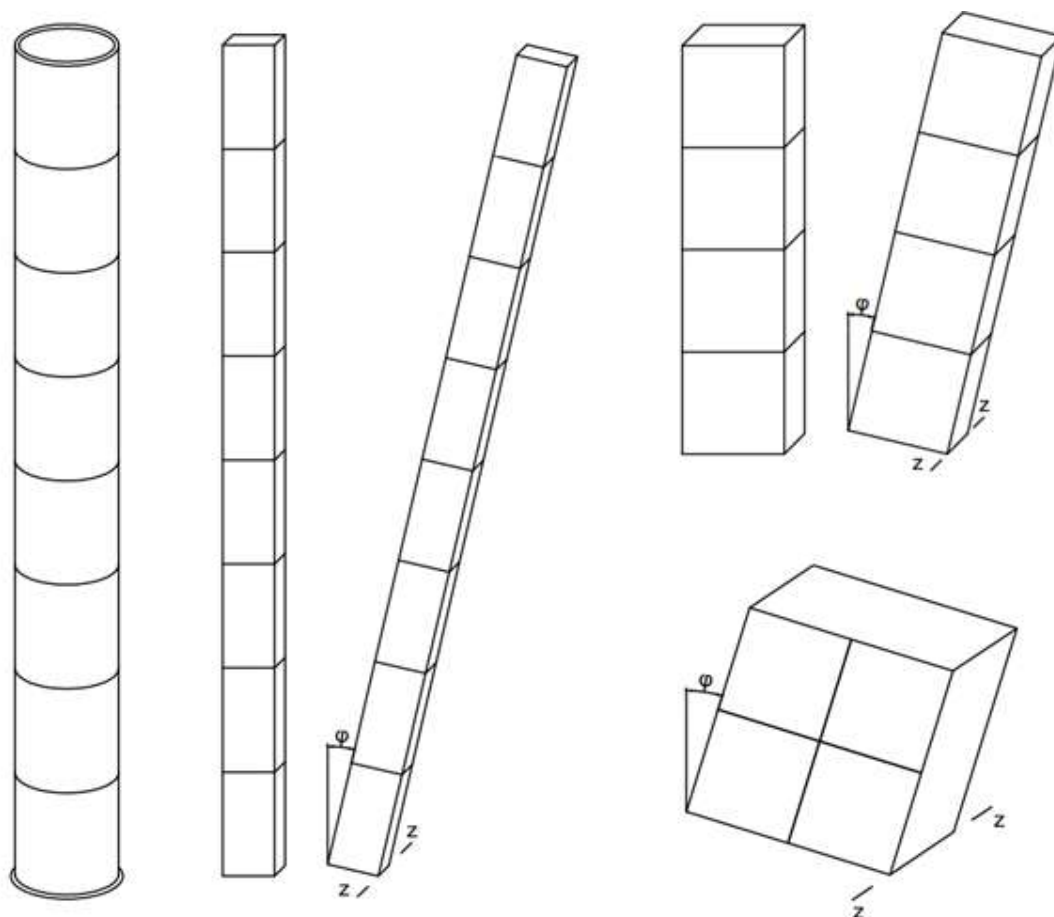
в вертикальной плоскости; переворот робота под водой на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$  относительно осей ориентации и др.

В данной работе рассмотрены процессы квазистационарного переориентирования и опрокидывания твердого тела на твердой поверхности.

Автору не известны результаты сравнительного анализа устойчивости и опрокидываемости технических систем. Вместе с тем, состояние отраслей подводной робототехники и профессиональной подготовки специалистов для морской индустрии характеризуется углубленным и ускоренным развитием [1-5]. При этом в технологиях освоения глубин акваторий, по количеству типов, суммарному тоннажу производимых аппаратов и функциональным возможностям преобладающими являются малые аппараты [3,4].

В целях интенсификации освоения океанотехники используются инновационные технологии обучения инженеров подводной робототехники, в том числе технологии сквозного проектно-конкурентного подхода к специальному образованию [4,6].

В работе, в целях компактности изложения, используется понятие гидротанк – гидробак, термин вложенный в определение термина гидроколонна. Постулируется, что гидроколонна – это вертикальный водный столб, заключенный в тонкостенную гибкую или мягкую оболочку регулярного секционированного вида, применительно к использованию одной или нескольких секций, рисунок 1.



**Рис.1.** Схемы цилиндрической секционированной гидроколонны постоянного объема с круговым и прямоугольным поперечным сечением, с высотой равной, соответственно 16, 8, 4, 2 и 1 длинам ребра единичного куба.

## **Требования к гидротанку**

Применительно к экспресс-технологиям проектирования подводных роботов античрезвычайно ситуационного назначения, базирующихся на сквозном интегративном выполнении 3D- пространственного геометрического моделирования, твердотельного автоматизированного 3D-конструирования, 3D-технологической подготовки, 3D- процессов принтерного изготовления комплектующих элементов робота «в железе» и виртуальной 3D- имитации гидродинамики среды робототехнических систем, заметно укорачивается фаза проектной разработки опытного образца. Одновременно увеличиваются сложность, длительность и трудоемкость испытаний и настройки робота под водой по критериям прочности, жесткости, устойчивости, герметичности и длительности безотказного функционирования в опытно-оперативной среде.

Однако, для целей разработки объектов малой подводной робототехники использование крупных экспериментальных научно-исследовательских центров аэрогидродинамики экономически нецелесообразно. Для инициативных, образовательных и креативных проектов требуются иные, оптимальные по критерию «информативность – стоимость», проектные решения типа гидроколонн и гидротанков. Развитие указанных объектов стимулирует исследование их собственных характеристик, в том числе устойчивости и опрокидываемости.

Анализ опрокидываемости гидротанка, как твердого тела, предшествует оценке устойчивости объекта как гидроупругой системы. Соответственно, здесь излагаются результаты первого законченного этапа, а результаты решения гидроупругой задачи на втором этапе представлены отдельно. В целом, подтверждена и экспериментально апробирована возможность разработки, изготовления и эксплуатации гидротанков для испытания и отладки подводных роботов.

Справочно, понятие водного столба используется в океанологии, как выделенная модель объекта исследования гидрологических параметров акватории и в др. областях техники [1,7].

Применительно к испытаниям объектов подводной робототехники и морской индустрии, а также при оценке их устойчивости под действием гравитационных и гидростатических сил, сил трения и реакций опор, внимание сфокусировано на анализе стабилизирующего и опрокидывающего моментов, эксцентриситете сил тяжести, остаточной массе жидкости в емкости и других параметрах, свойственных явлению опрокидываемости.

## **Математические модели**

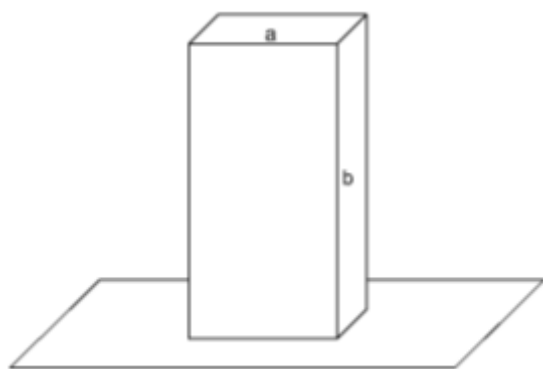
В смысле эксперимента непосредственный прикладной и образовательный интерес представляют: локальные состояния равновесия на наклонном донном основании роботизированной буровой установки; старт-стопные режимы передвижения и переориентации робота в пространстве бассейна по всем 6 координатам; автоколебания при пассивном всплытии по вертикали; оптимизация наклонных траекторий активного всплытия; цирку-

ляции движения на определенной глубине; генерация волн свободной поверхности; лавирование по заданному траекторному меандру, гидроакустические, лазерные и др. эксперименты в бассейне.

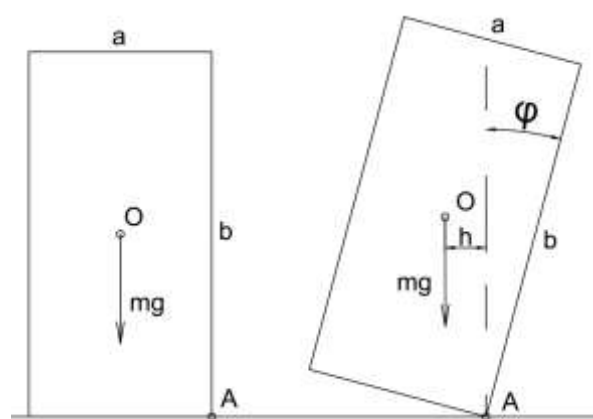
Одной из достаточно полной по состоянию на данный момент, математической моделью гидротанка, является оболочечная модель отображения устойчивости и эффектов напряженно-деформированного состояния свободно стоящей гидроколонны, например, в виде подкрепленной цилиндрической эллипсоидальной свободно с трением опирающейся оболочки. Возможны различные варианты модели на базе аналитических теорий оболочек [9-11]. Предпочтительными представляются: численные конечно - разностные МКЭ, вследствие их универсальности [12,13]; геометрические, вследствие их информационной компактности [15], и обобщенные энергетические методы анализа исследуемой системы [14]. Оценка возможности применения каждой из моделей указанных типов предполагает до- и после проектное исследование области достоверности ожидаемых результатов.

Технические решения проблем опрокидываемости и остойчивости присутствуют также в проектах транспортных комплексов, манипуляционных робототехнических систем, морских инженерных сооружений и в ряде других отраслей технических знаний, в том числе, в теории корабля, в теоретических обоснованиях автомобильных, железнодорожных, водных и др. контейнерных систем перевозок.

Как было отмечено, в настоящей публикации представлены результаты, базирующиеся на использовании модели твердого тела с несжимаемой жидкостью. В отдельной публикации - результаты исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости гидротанка. При этом результаты настоящего исследования используются в качестве нулевого приближения для последующего. Таким образом, прежде чем обратиться к трехмерной 3D-геометрической модели упругой секции гидроколонны- гидротанка, рассмотрим её сначала как заполненное жидкостью недеформируемое затвердевшее тело, рисунки 2 и 3.



**Рисунок 2.** Тело, опрокидываемое относительно определенного ребра габаритного контейнера



**Рисунок 3.** Тело в вертикальном положении и в отклоненном состоянии плоского наклона

Вопросы гидроупругой устойчивости и опрокидываемости емкости с жидкостью имеют практическое значение не только для обеспечения функциональности робототехнических систем, но и для других технических систем функционирующих в условиях морского волнения, при ветровых порывах, землетрясениях, выполнении буровых, грузоподъемных и такелажных работ на наклонной поверхности, в частности-донной, и в др. оперативных ситуациях жизненного цикла технической системы [1, 7, 8].

### Качественный анализ

Исходя из предпосылок о симметрии системы, однородности тела, односвязности полости и др. групповых признаков можно видеть, что при любом наклоне тела расположение центра масс (ЦМ) будет оставаться неизменным относительно системы координат (СК), связанной с емкостью и началом, располагающимся в точке пересечения диагоналей параллелепипеда (т.О). Очевидно, кривая геометрического места центров масс при наклоне тела всегда имеет вид дуги окружности, при любом соотношении сторон  $b/a$  и распределении масс, зафиксированных в объеме контейнера.

Подтвердим указанные интуитивно правдоподобные результаты представлением ряда расчетных зависимостей и графиков на примере рисунка 4 для: полукуба  $b=0,5a$ ; единичного куба  $b=a$ , удвоенного куба  $b=2a$ . Для удобства сопоставления, триада рассматриваемых объектов расчета: полукуб; куб; удвоенный куб используется далее везде. В рассматриваемом случае графики траекторий центра масс представлены в координатах  $x(\varphi)$ ,  $y(\varphi)$ . Как и следовало ожидать, кривая центра масс для куба симметрична относительно оси ординат. В случае  $b=0,5a$ ;  $b=2a$ , вследствие неравенства сторон опрокидываемого тела, указанная кривая несимметрична, в зависимости от того с какой стороны и на какую опрокидывается тело – с длинной стороны на короткую или с короткой на длинную.

Для дальнейшего существенно необходимы:  $h$ -удаление центра масс - эксцентриситет от вертикали в точке опоры; масса жидкости  $m$ . Момент силы тяжести относительно опорной точки А:

$$M = mgh \quad (1)$$

Масса жидкости в данном случае не изменяется, т.е.  $m=const$ , т.к. рассматриваемая емкость принадлежит к типу закрытых, из которых, по определению, жидкость не выливается.

### Плоское движение твердого тела

Для определения длины плеча  $h$  силы тяжести отождествим твердое тело с плоской фигурой продольного сечения цилиндрического гидротанка, рисунок 3. В дополнение обозначим:

$O_g x_g$  – инерциальная система координат;

$Oxy$  – связанная с подвижной фигурой система координат;

$OA$  – индикаторный отрезок положения фигуры;

$x_0, y_0, a_0$  – параметры начального положения фигуры;

$\bar{\rho}, \bar{\omega}, \bar{r}$  – радиус – вектор центра поворота фигуры, искомый вектор, индикаторный вектор;

$\varphi$  – угол поворота системы координат  $Oxy$  относительно системы координат  $O_g x_g y_g$ .

В соответствии с обозначениями, в общем случае

$$\bar{\rho} = \bar{\omega} + D\bar{r} \quad D = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

где  $D$  – матрица поворота на плоскости. При произвольном начальном расположении фигуры

$$x_g = x_0 + x\cos\varphi - y\sin\varphi, \quad y_g = y_0 + y\cos\varphi + x\sin\varphi \quad (3)$$

В частном случае опрокидывания относительно ребра  $x_0 = 0; y_0 = 0$  процесс определяется параметром  $\varphi$  и координаты центра масс принимают вид

$$x_{цм} = \frac{1}{2}(b\sin\varphi - a\cos\varphi); \quad y_{цм} = \frac{1}{2}(b\cos\varphi + a\sin\varphi) \quad (4)$$

Без индексации, соответственно, координаты центра масс  $O$  относительно точки  $A$  примут вид:

$$O\left(\frac{b\sin(\varphi) - a\cos(\varphi)}{2}; \frac{b\cos(\varphi) + a\sin(\varphi)}{2}\right)$$

Значения плеч силы тяжести  $h(\varphi)$  представлены графически, рисунок 5, в зависимости от угла наклона для тех же соотношений сторон:  $b=0,5a; b=a; b=2a$ , соответственно для полукуба, единичного куба, двойного куба, как и раньше.

Можно заметить, что монотонная пологая кривая эксцентриситета в заданном интервале имеет, в зависимости от формы тела, одно критическое значение, соответственно для полукуба, единичного куба, двойного куба:  $\varphi_{кр} = \pi/6; \varphi_{кр} = \pi/4; \varphi_{кр} = \pi/3$ . Процесс может быть циклическим.

В результате, на рисунке 4, выявляется: все траектории ЦМ начинаются на вертикали  $x(\varphi) = -a/2$ ; заканчиваются на горизонтали  $y(\varphi) = a/2$ ; траектория ЦМ куба симметрична относительно оси  $y(\varphi)$ ; возможно непрерывное перемещение путем циклического кантования; траектория – регулярная цепь дуг окружности. На рисунке 5 можно видеть: постоянный начальный эксцентриситет  $h(\varphi) = -a/2$ ; критический угол полукуба, единичного куба, двойного куба:  $\varphi_{кр} = \pi/6; \varphi_{кр} = \pi/4; \varphi_{кр} = \pi/3$  и эксцентриситет  $h(\varphi) = b/2$  после опрокидывания.

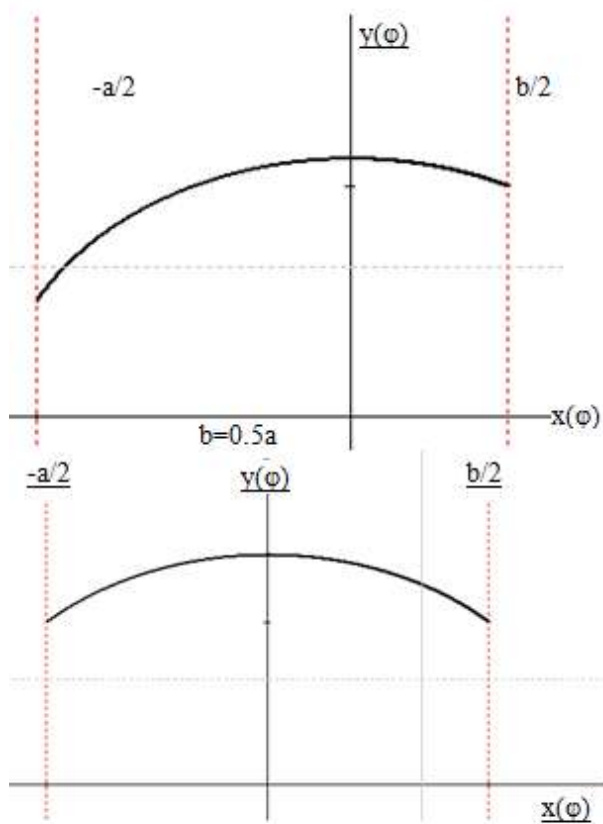
Момент сил тяжести оболочки с условно «замороженной» жидкостью относительно точки опоры

$$M = \frac{mg}{2}(b\sin(\varphi) - a\cos(\varphi)) \quad (5)$$

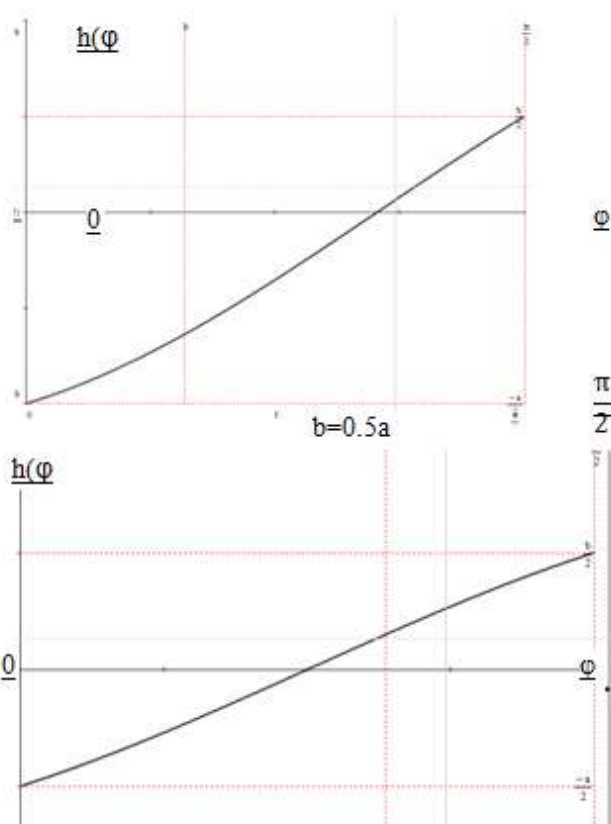
Максимальный по модулю, стабилизирующий и дестабилизирующий моменты тела с «замороженной» жидкостью достигается по краям интервала  $(0 < \varphi < \pi/2)$ .

Критическому углу наклона  $\varphi_{kp} = \arctg(\lambda)$ .

Критическое удаление от точки экстремума-эксцентриситет  $h(\varphi_{kp}) = 0$ .



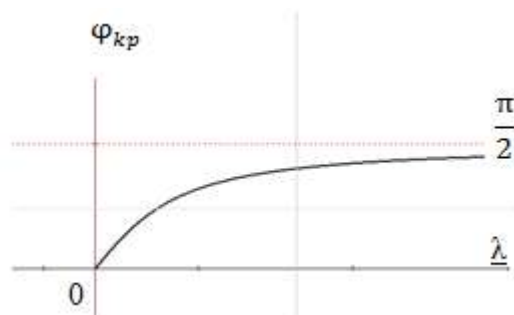
**Рисунок 4.** Геометрическое место точек центра масс опрокидываемого тела при:  $b=0,5a$ ;  $b=a$ ;  $b=2a$



**Рисунок 5.** Плечо-эксцентриситет силы тяжести относительно точки опрокидывания при:  $b=0,5a$ ;  $b=a$ ;  $b=2a$

Зависимость критического угла наклона  $\varphi_{kp}$  от относительной высоты колонны  $\lambda$  представлена на Рисунке 6.





**Рисунок 6.** Обобщенная графическая зависимость критического угла наклона  $\varphi_{кр}$  от относительной высоты колонны  $\lambda$

Параметры опрокидывания кубической емкости.

Кубическая емкость является частным случаем призматической емкости ( $a=b$ ). Следовательно,

координаты центра масс:  $O(a \frac{\sin(\varphi) - \cos(\varphi)}{2}; a \frac{\cos(\varphi) + \sin(\varphi)}{2})$  ;

эксцентриситет  $h = a \frac{\sin(\varphi) - \cos(\varphi)}{2}$ .

Момент силы тяжести относительно точки А:

$$M = \frac{mga}{2} (\sin(\varphi) - \cos(\varphi)) \quad (6)$$

Максимальный стабилизирующий момент :

$$M_{max} = \frac{mga}{2}$$

Очевидно, критические моменты для кубической (3) и призматической (4) емкостей закрытого типа идентичны. В рассматриваемом случае критический угол наклона  $\varphi_{кр}$ :

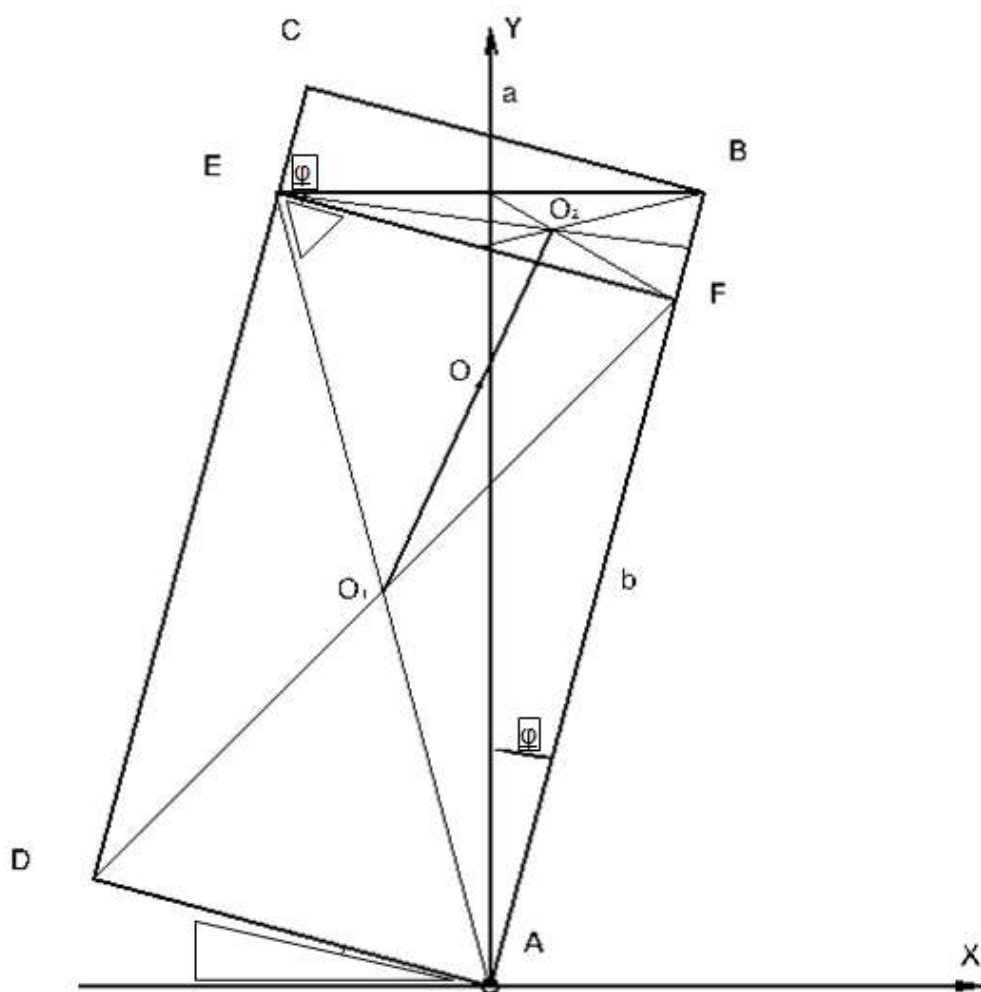
$$\varphi_{кр} = \arctg(\lambda) = \arctg(1) = \frac{\pi}{4}$$

### Параметры опрокидываемой открытой емкости

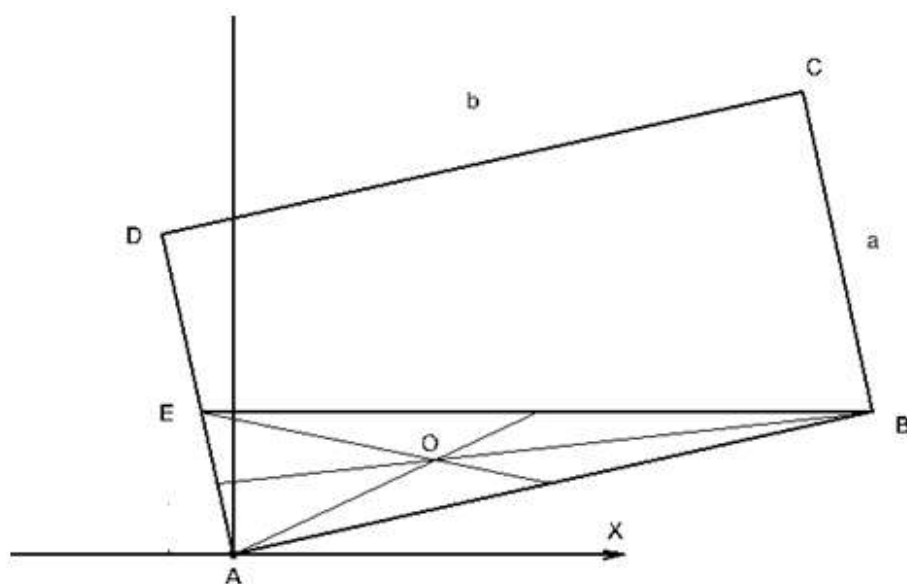
Моделирование квазистатического опрокидывания открытой емкости, с возможностью естественного выливания части жидкости, в основном, ведется так же как и ранее, но с соответствующими дополнениями. На рисунке 7 представлена начальная фаза опрокидывания, а на рисунке 8 завершающая фаза.

На рисунке 7 начальной фазой опорожнения сосуда является прямоугольный смоченный контур сечения сосуда – ABCD. Промежуточный смоченный периметр - неравнобокая прямоугольная трапеция ABED. Пограничный смоченный контур – трапеция ABED. Завершающей фазе выливания жидкости соответствует смоченный треугольный периметр ABD.





**Рисунок 7.** Призматический сосуд с возможностью выливания жидкости. Начальная фаза опорожнения сосуда при опрокидывании.



**Рисунок 8.** Сосуд с жидкостью в завершающей фазе опрокидывания. Смоченный периметр сечения – прямоугольный треугольник ABE.

В отличие от предыдущего выражения (5), момент силы тяжести относительно т. А

$$M(\varphi) = m(\varphi)gh(\varphi)$$

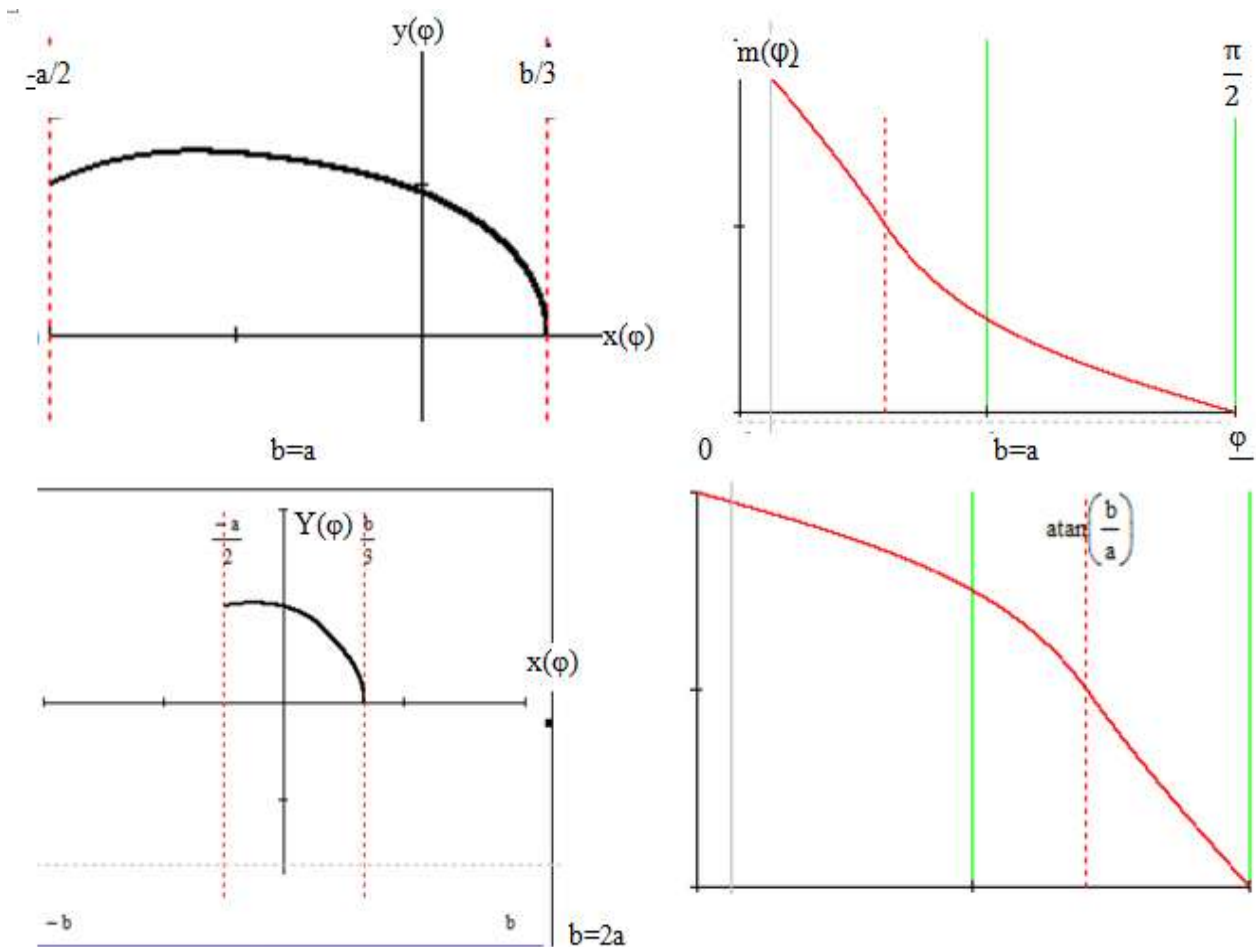
Определение координаты центра масс. Оставаясь в границах геометрического подхода, рассмотрим типизацию нескольких последовательных конфигураций водного тела, рисунки 7 и 8, образующихся частью вылившегося и частью оставшегося содержимого в призматическом контейнере:

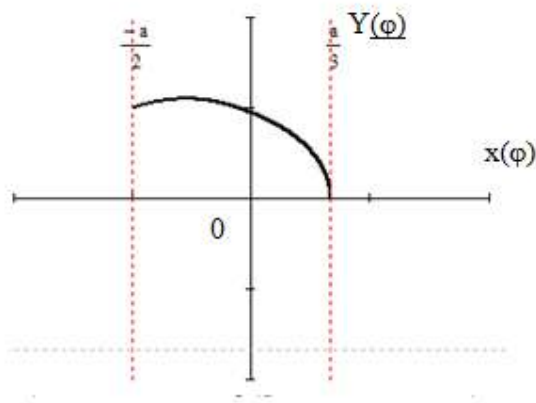
Найдем координаты поворотных точек А, В, D, E, F, O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> границ содержимого.

Рассмотрим несколько состояний в интервалах

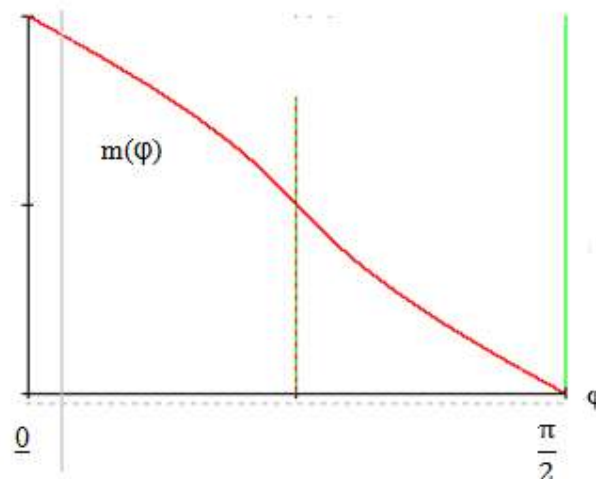
$$1) |\varphi| \leq \arctg\left(\frac{b}{a}\right), \quad 2) \arctg\left(\frac{b}{a}\right) < |\varphi| \leq \frac{\pi}{2}$$

**Результатом является определение и** представление на Рисунке 9 геометрического места точек центра масс сосуда с естественно вытекающей при наклоне сосуда жидкостью.. На Рисунке 10 можно будет видеть изменение массы сосуда с вытекающей жидкостью при наклоне сосуда, с тем же заданным соотношением сторон.





**Рисунок 9.** Геометрическое место точек центра масс сосуда с естественно вытекающей жидкостью при наклоне сосуда с соотношением сторон:  $b=0,5a$ ;  $b=a$ ;  $b=2a$ .



**Рисунок 10.** Масса жидкости в емкости при наклоне призматического сосуда с соотношением сторон:  $b=0,5a$ ;  $b=a$ ;  $b=2a$ .

Заметно, в сравнении рисунка 9 с рисунком 4, совпадение начального положения центров масс закрытой емкости с открытой, допускающей выливание жидкости. В целом траектория ЦМ открытой емкости идет ниже, чем у закрытой и при  $\varphi=\pi/2$  масса обнуляется. Можно видеть, рисунок 10, что в зависимости от конфигурации емкости и параметра наклона, истечение идет с различной скоростью при одних и тех же углах наклона.

Найдем координаты точек В,Е

$$:B(b\sin(\varphi); b\cos(\varphi)); \quad E\left(\frac{-b\cos^2(\varphi)}{\sin(\varphi)}; b\cos(\varphi)\right).$$

Следовательно, т.О имеет следующие координаты:  $O\left(\frac{b(\sin^2(\varphi)-\cos^2(\varphi))}{3\sin(\varphi)}; \frac{2b\cos(\varphi)}{3}\right)$ .

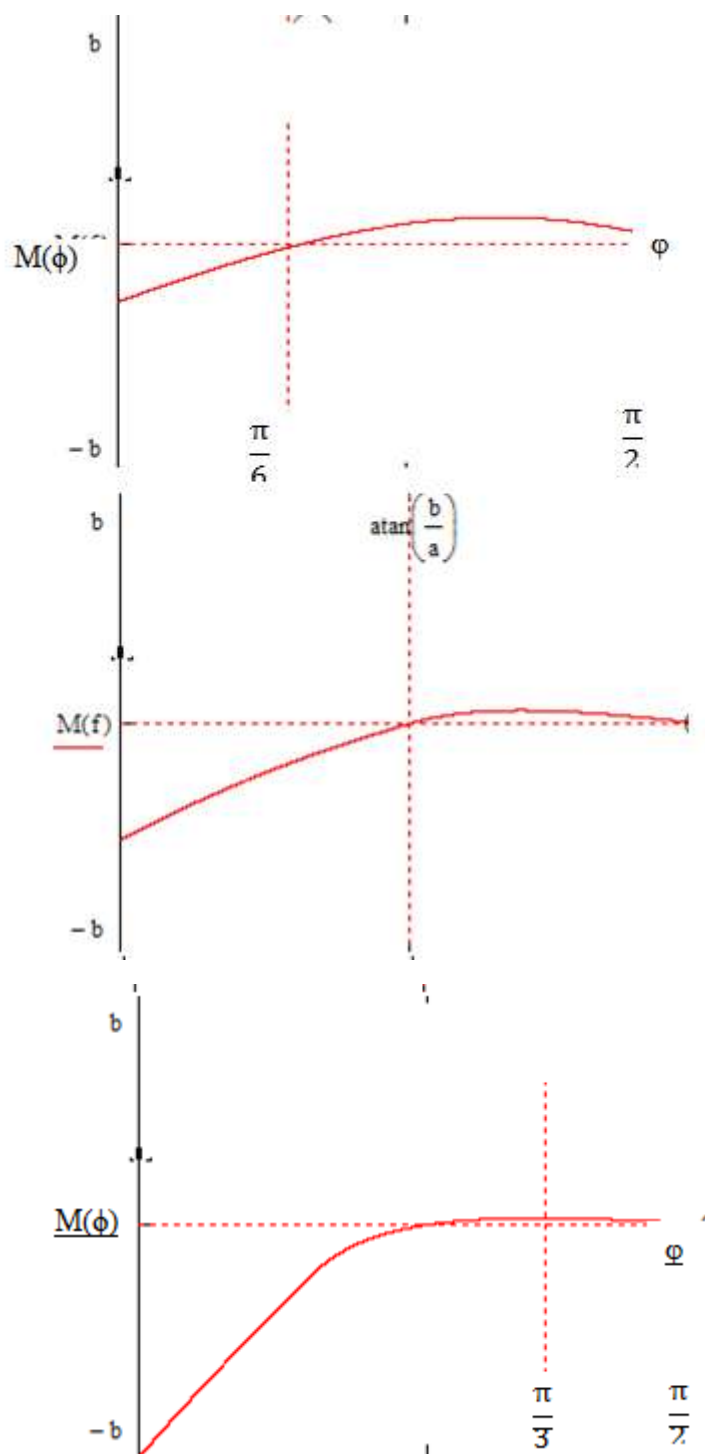
Соответственно длина плеча:

$$h(f) = \begin{cases} \frac{O_{1x}S_{AFED} + O_{2x}S_{FBE}}{S_{AFED} + S_{FBE}}; & |\varphi| \leq \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \\ \frac{b}{3\sin(\varphi)}; & \arctg\left(\frac{b}{a}\right) < |\varphi| \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8)$$

Зависимость остающейся в контейнере массы жидкости и момента опрокидывания от угла наклона:

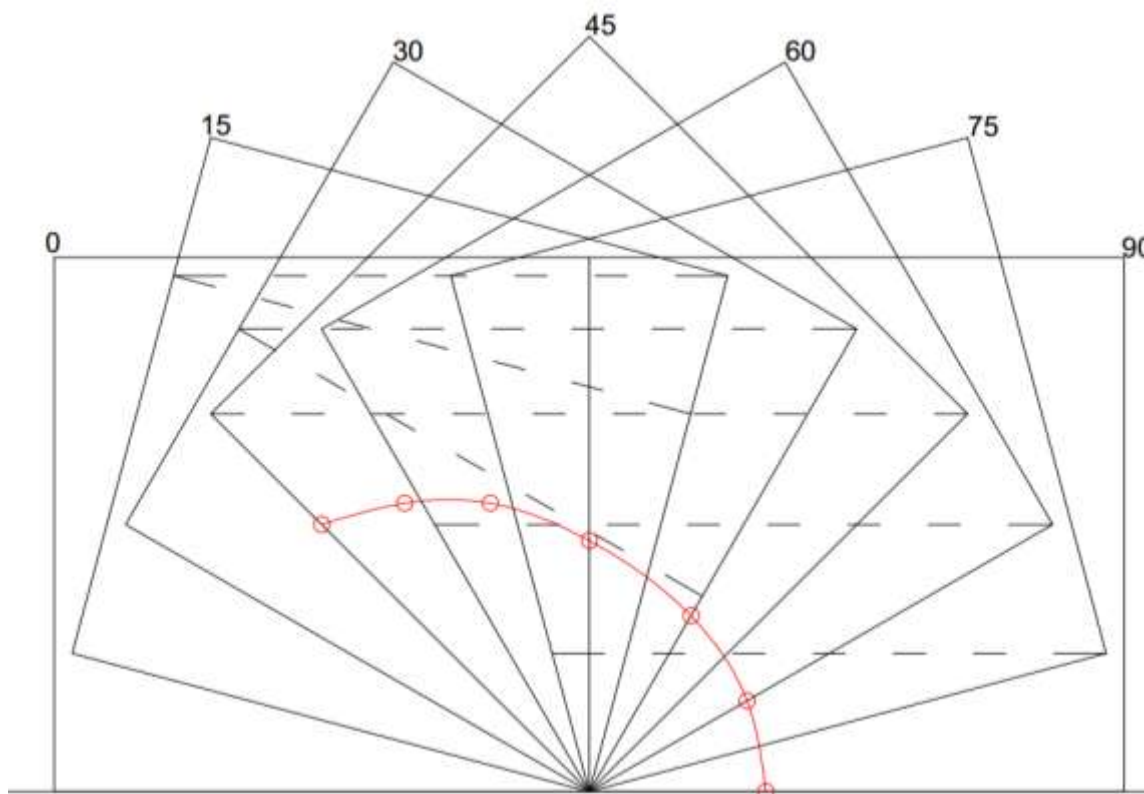
$$m = m_0 * \begin{cases} \frac{2b - a * \tg(\varphi)}{2b}; & |\varphi| \leq \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \\ \frac{b * \cos(\varphi)}{2a * \sin(\varphi)}; & \arctg\left(\frac{b}{a}\right) < |\varphi| \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$M = m(\varphi)g h(\varphi) \quad (10)$$



**Рисунок 11.** Момент силы тяжести призматического открытого сосуда с жидкостью, естественно вытекающей при наклоне сосуда с соотношением сторон:  $b=0,5a$ ;  $b=a$ ;  $b=2$  относительно опорной точки опрокидывания.

Диаграмма  $M=M(\varphi)$ , рисунок 11, получена в предположении наличия в системе плоской недеформируемой донной диафрагмы, взаимодействующей, до опрокидывания, с основанием по всей поверхности диафрагмы. Максимальный стабилизирующий момент имеет место в начальной точке.



**Рисунок 12.** Геометрическое место точек центра масс кубического сосуда с жидкостью, естественно выливающейся при квазистационарном наклоне сосуда, поворачивающегося без проскальзывания относительно оси опоры, совпадающей с ребром куба.

Диаграмма представляет квазискан-изображение процесса опрокидывания единичного куба. Шаг дискретизации процесса  $\Delta\phi=\pi/12$

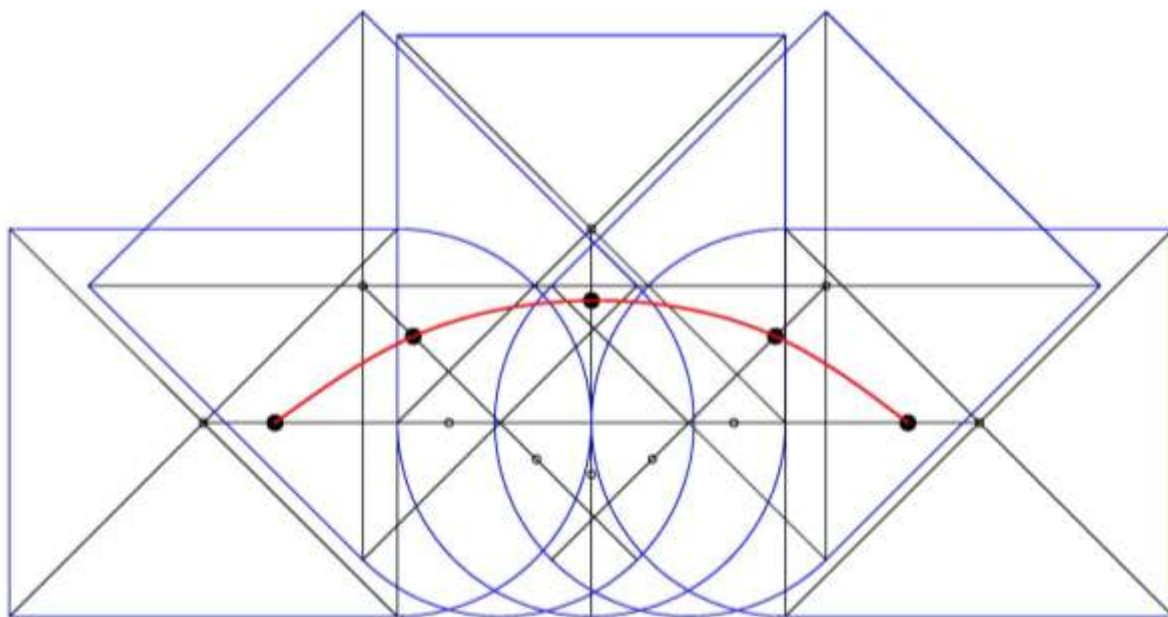
## Опытные лабораторные мини бассейны

Известен класс малых стендовых бассейнов различного типа и функционального назначения, в том числе: стационарные, с неподвижной водной массой; перемещаемые на разгонных ракетных платформах; переориентируемые; опрокидываемые; с вращающейся водной массой и др.

Рассматриваемая разновидность свободно стоящих с трением и опрокидываемых гидросекций представляет интерес для создания экспозиционных и демонстрационных стендов, а также в виде достаточно объемной искусственной акватории с действующими подводными роботами. Прием опрокидывания гидросекции обеспечивает: быстрое наполнение и удаление жидкости при наличии достаточной пропускной способности канала

дренажа; транспортабельность всеми видами носителей; выполнение требований к рабочей среде бассейна; удобство обслуживания.

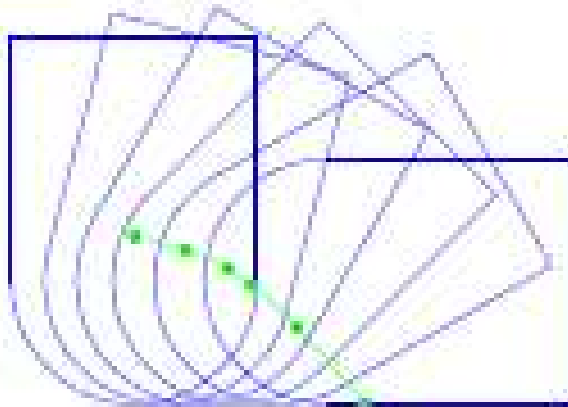
Проведение структурной декомпозиции действующей системы и освобождение рабочего пространства робототехнического гидротанка от систем наполнения-опорожнения, фильтрации, динамометрических, акустических, лазерных и др. устройств, позволяет выделить базовую оболочечную конструкцию, содержащую: цилиндрическую обечайку, с эллипсоидальной направляющей; плоскую подошвенную диафрагму; силовой набор из стрингеров и шпангоутов. Указанная конструкция рассматривается в качестве конструктивно-силового основания гидротанка. Пространственная модель типичного бака опытового комплекса, освобожденного от навесных инструментов и устройств, показана на Рисунке 16.



**Рисунок 13.** Закрытый, заполненный жидкостью кубоцилиндр, без возможности выливания её, при перекачивании цилиндрической опоры по поверхности, без проскальзывания, с возможностью опрокидываться в прямом и обратном направлении по часовому циферблату или против. Траектории центров масс нижняя кривая - траектория отдельно для цилиндрического сегмента; верхняя - для суммарного значения масс кубоцилиндра.

Модель заполненного и закрытого кубоцилиндра может отождествляться с моделью твердого тела, только в исходном состоянии. Шаг дискретизации угла опрокидывания  $\Delta \phi = \pi/8$

На рисунке 14 представлена емкость открытого, заполненного жидкостью кубоцилиндра, с возможностью выливания её, при перекачивании опоры по поверхности, без проскальзывания с возможностью опрокидываться в направлении по часовой стрелке. Траектория центров масс для противоположного направления зеркально симметрична. Траектория центров масс рассматриваемого бассейна существенно отличается от бассейна с невыливающейся жидкостью.



**Рисунок 14.** Декомпозиция открытого, заполненного жидкостью кубоцилиндра, с возможностью выливания её, при перекачивании опоры по поверхности, без проскальзывания с возможностью опрокидываться в направлении по часовой стрелке. Траектория центров масс для противоположного направления зеркально симметрична.

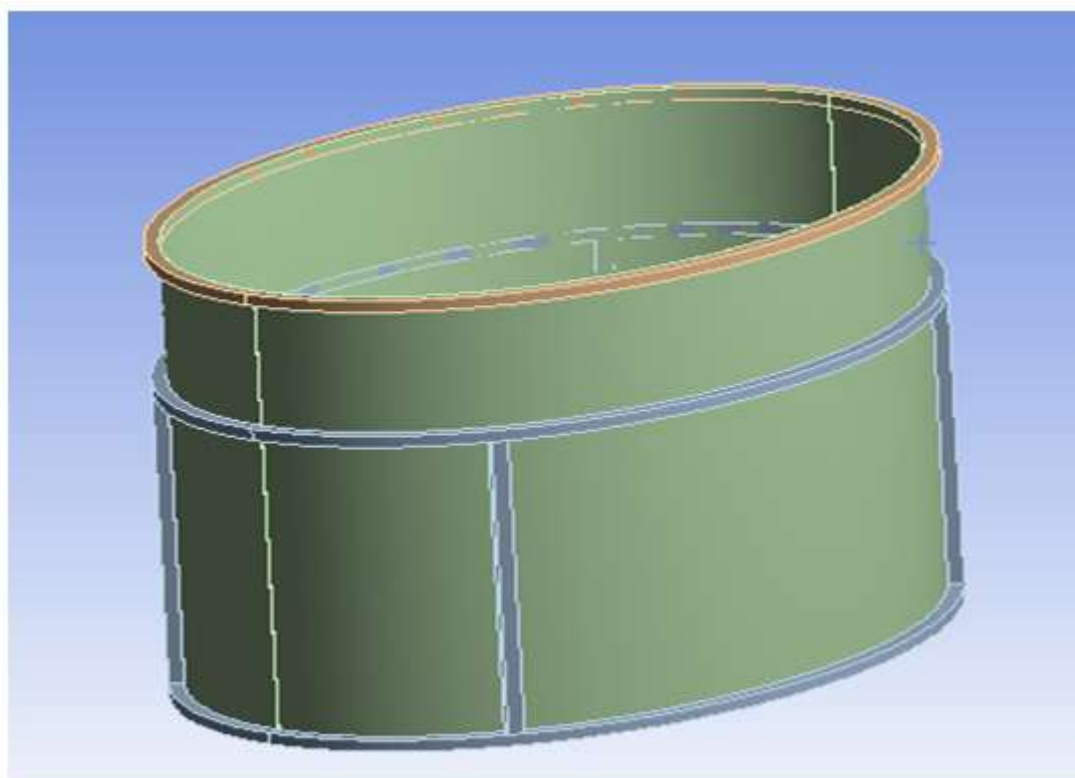
Шаг дискретизации угла опрокидывания  $\Delta \phi = \pi/10$

На рисунке 15, представлена эллипсоидально-цилиндрическая обечайка одной секции конструктивно-силового основания бассейна для испытаний подводных роботов. Секция представлена как конструктивный элемент гидроколонны без какого либо инвентария и устройств наблюдения, измерения функциональных характеристик подводного робота. Секции могут наращиваться по высоте до заданного значения с обеспечением требуемых параметров прочности, устойчивости, жесткости и герметичности. Для определенности относительных параметров приняты: длина-3 м; ширина-2 м; высота- 2м; толщина стенок-2 мм; масса конструкции- 390 кг; рабочий объем- 9,64 м<sup>3</sup>.

Предшественником таких устройств может быть указан многофункциональный комплекс на базе малого бассейна призматической формы конструкции ЦАГИ, представленный выше. Комплекс, при соответствующем доукомплектовании, позволяет производить гидростатические, гидродинамические, балансировочные, гермоконтрольные, электроизоляционные и др. операции с натурными и модельными маломерными объектами в воде. Возможности проведения опытов и экспериментов определяются размерами объектов и естественными ограничениями: объем  $Q=2\text{ м}^3$ ; главные размеры  $L*B*H=2*1*1=2\text{ м}^3$ . Бассейн, весьма податливый к распирающему гидростатическому давлению на боковые панели, выполненный из нержавеющей стали толщиной  $\delta=2\text{ мм}$ , доработан и подкреплён ребрами жесткости.

Для предотвращения прогибов панели и окаймления, по длинной стороне установлены стяжки. При этом жесткость увеличивается и входит в допустимые пределы, но дополнительные элементы затрудняют установку объектов и доступ операторов к рабочему пространству бассейна.





**Рисунок 15.** Эллипсоидально-цилиндрическая обечайка секции конструктивно-силового основания бассейна для испытаний подводных роботов, без инструментария и измерительных устройств

Длина-3 м	Ширина-2 м	Высота- 2м
Толщина стенок-2 мм	Масса конструкции- 390 кг	Рабочий объем- 9,64 м <sup>3</sup>

Министенд является устройством, свободно устанавливаемым на горизонтальный силовой пол. Минимальный необходимый момент опрокидывания относительно нижнего продольного ребра  $M_{opr}=mgh$ . Критический угол наклона  $\varphi_{кр}=\arctg(b/h)$ . Их значения:  $M_{opr}=842\text{Нм}$ ;  $\varphi_{кр}=36^\circ$ .

Указанный стенд целесообразен для малобюджетных и инновационно-образовательных проектов. В частности, стенд позволяет оценивать работоспособность гермовводов, выявлять каналы капельной течи корпусов; испытывать ВМА до выработки бортового запаса энергоносителя; экспериментально определять ресурс по износу например, магнитных муфт.

Преимущества малого призматического опытового бассейна: полный доступ к любой точке водного тела; прочность оболочки; жесткость каркаса; транспортабельность в сборе; установка на выступающие опоры без контакта днищевой диафрагмы с основанием. Недостатки: малость объема рабочего пространства для испытаний подводных роботов в сборе, массой 5-25кг; необходимость конструктивных доработок для снижения деформативности.

Преимуществами достаточно большого пространства для эксперимента обладают полимерные каркасированные бассейны с мягкой складывающейся оболочкой. Полимер-

ные бассейны в виде мягких оболочек, не имеющих собственной формы, свободно вкладываются в поддерживающий каркас. Полимерный бассейн легко собирается/разбирается и переустанавливается. Однако, этот и аналогичные типы имеет существенный недостаток в том, что их оболочка сваривается из листового низко модульного материала. При любом сколь угодно заметном соударении подводного робота о стенку или дно бассейна возможны нарушения целостности обечайки бассейна и появление микро течей. Оценим вероятность таких воздействий. Подводные роботы функционируют в бассейне со скоростью до 4м/с. Масса ПР – до 25кг. В соответствии с законом сохранения импульса  $mV = F \delta t$ , при  $\delta t = 80$  миллисекунд максимальное значение силы составит  $F = 1250\text{Н}$ , что определяет высокую вероятность локального разрушения.

## Заключение

В качестве альтернативы стационарным бассейнам введены в рассмотрение и анализируются опытовые металлические гибкие эластичные бассейны типа гидротанк, выполненные из тонколистового нержавеющей материала в форме прямой цилиндрической оболочки, с эллипсоидной направляющей, свободно, с трением, опирающейся на плоское жесткое основание. Как показывает опыт, гидротанк удовлетворяет требованиям минимума материалоемкости конструкции, функциональной адекватности среды подводных роботов, адаптивности форм рабочего пространства, прочности, герметичности, транспортабельности. Основные проектные параметры гидротанка определены инженерными методами с использованием изопериметичности упругой линии шпангоутов, постоянства массы и объема жидкости в бассейне при всех видах деформаций бассейна, аналитическими соотношениями безмоментной теории упругих оболочек, результатами геометрического моделирования. Проблема определения основных и критических параметров опрокидываемости решена аналитически в предположении, что объект является твердым телом.

Проблема жесткости и гидроупругой устойчивости каркаса и обечайки конструктивно-силового основания требует учета суперпозиции эффектов геометрических, физических и структурных нелинейностей. Стандартные прочностные программы ANSYS, NASTRAN при анализе НДС гидротанка выдают информацию сопоставимую с экспериментальными данными по напряжениям и деформациям срединной поверхности обечайки и совершенно несопоставимые, различающиеся на 2 порядка, значения нормальных перемещений. Проблемы гидроупругой опрокидываемости и устойчивости детально рассматриваются отдельно.

## Список литературы

1. Технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии». 2011. 780 с.
2. Remotely Operated Vehicles of the World 2010/2011. London Eng., Huston USA. 458 с.

3. Северов С.П., Розман Б.Я., Елкин А.В. Малые подводные аппараты в океанотехнике // Современные методы и средства океанологических исследований: Междунар. научно-техническая конф.: Труды. М.:Изд. ИОРАН, 2009. с. 201.
4. Северов С.П., Розман Б.Я. и др. Международные соревнования ROV // Современные методы и средства океанологических исследований: Междунар. научно-техническая конф.: труды. М.: Изд. ИОРАН, 2009. с. 135.
5. Вельтищев В.В., Челышев В.А. Телеуправляемые подводные аппараты в России: современное состояние и перспективы развития // Современные методы и средства океанологических исследований: Междунар. научно-техническая конф.: труды. М.: Изд. ИОРАН, 2007. с.89.
6. Северов С.П. Инновационные технологии профессиональной подготовки инженеров подводной робототехники и морской индустрии в России // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 3. С. 282–295.
7. Moore [S.W.](#), [Bohm](#) Н., [Jensen](#) V. Underwater Robotics: Science, Design and Fabrication. USA, CA, Monterey, Marine Advanced Technology Education Center (MATEC). 2010. 769 p.
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). The Fourth Edition. PMI, 2013. 619 p.
9. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. СПб.: Изд-во СПб. ун-та,. 2010, 380 с.
10. Северов С.П. Исследование процесса выворачивания металлических оболочек // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1971. №6.
11. Северов С.П. О реализации шагового метода анализа деформируемых систем // 8-ая Всесоюзная конференция по теории оболочек и пластин: труды. М.: Наука, 1973.
12. Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
13. Деклу Ж. Метод конечных элементов: пер. с франц. М.: Мир, 1976. 96 с.
14. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем.-2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 336с.
15. Погорелов А.В. Геометрическая теория устойчивости оболочек. М.: Наука, 1966.
16. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967, 984с.
17. Феодосьев В.И. Осесимметричная эластика сферической оболочки // Прикладная математика и механика. 1969. т.33. № 2. С. 280-286.

## **Stability and Capsize of Free-Standing Hydrotank: Development of Trial Tanks to Test Underwater Robots**

**S.P. Severov<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** hydro tray, hydrocolumns, hydrostatics, hydraulic tank, hydro pipe, hydroelasticity, underwater test, underwater robot, sustainability

---

The problem of capsizing object, which are free-supported under the forces of gravity, elasticity, friction, and other unpredictably changing external influences, is a global challenge for the civil engineering and for transport (air, road, rail, and others). Much of the research activities on capsizing the free-supported objects of the certain types are fragmentarily included in the different subject areas of technical applications. In particular, it is typical for a hydrotank that is a thin-walled shell-type liquid-filled container. The hydrotank problems are multiple structural, geometric and natural forms of nonlinearity. The aim of this study is to determine the phase and the critical parameters of the basic objects of simple shape with different supporting plane: cube; box; cylinder etc., pouring the fluid, with or without shell. Hydrotank capsize as a solid body with a fluid is analysed and as a first approximation this analysis precedes the assessment of stability of the object as a hydroelastic system. The experimental results prove the possibility to design, manufacture and use this type of hydrotanks to test underwater robots. The work gives more understanding on the studied problem and on the sphere wherein results can be efficiently implemented.

### **References**

1. *Technologies and means of development of the oceans*. Moscow, Weapons and technology Publ. house, 2011. 780 p. (in Russian).
2. *Remotely Operated Vehicles of the World 2010/2011*. London Eng., Huston USA. – 458 pp.
3. Severov S.P., Rozman B.Ya., Elkin A.V. [Small underwater vehicles in ocean engineering]. *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy: Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskaya konf.: trudy* [Modern methods and tools for Oceanographic research. Int. scientific conference. Proc.]. Moscow, IORAN Publ., 2009. p. 201. (in Russian).
4. Severov S.P., Rozman B.Ya., e.a. [International ROV competition]. *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy: Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskaya*

- konferentsiya: trudy* [Modern methods and tools for Oceanographic research. Int. scientific conference. Proc.]. Moscow, IORAN Publ., 2009. p. 135. (in Russian).
5. Vel'tishchev V.V., Chelyshev V.A. [Remotely-operated underwater vehicles in Russia: modern state and prospects of development]. *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy: Mezhdunar. nauchno-tehnicheskaya konf.: trudy* [Modern methods and tools for Oceanographic research. Int. scientific conference. Proc.]. Moscow, IORAN Publ., 2007, p.89. (in Russian).
  6. Severov S.P. Innovative technology of training engineers of underwater robotics and marine industry in Russia. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no.10, pp.1-15. (in Russian).
  7. Moore [S.W.Bohm](#) H., [Jensen](#) V. *Underwater Robotics: Science, Design and Fabrication*. USA, CA, Monterey, Marine Advanced Technology Education Center (MATEC). 2010. 769 p.
  8. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). The Fourth Edition*. PMI, 2013, 619 p.
  9. [Novozhilov](#) V. V. *Teoriya tonkikh obolochek* [Theory of thin shells]. St. Petersburg University Publ., 2010, 380 p. (in Russian).
  10. [Severov](#) S.P. Study of the process of twisting metal shells. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Proceeding of Academy of Sciences of the SSSR. Rigid body mechanics*, 1971. no. 6. (in Russian).
  11. [Severov](#) S. P. [On the implementation of the method of analysis of deformable systems]. 8th all-Union conference on theory of shells and plates. Proc. Moscow, Nauka, 1973. (in Russian).
  12. [Gallagher](#) R.H. *Finite Element Analysis. Fundamentals*. New Jersey,: Prentice-Hall, 1975.(Russ. ed.: Galager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow, Mir Publ., 1984. 428 p.).
  13. Descloux J. *Methode des elements finis*. [Suisse](#), Lausanne, Departement de mathematiques, 1973. (Russ. ed.: Deklu Zh. *Metod konechnykh elementov*. Moscow, Mir Publ., 1976, 96 p.).
  14. [Alfutov](#) N.A. *Osnovy rascheta na ustoichivost' uprugikh sistem* [The basis of calculation of the stability of elastic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. (in Russian).
  15. Pogorelov A.V. *Geometricheskaya teoriya ustoichivosti obolochek* [Geometric theory of stability of shells]. Moscow, Nauka, 1966. (in Russian).
  16. Vol'mir A.C. *Ustoichivost' deformiruemykh sistem* [Stability of deformable systems]. Moscow, Nauka, 1967, 984 p. (in Russian).
  17. Feodosiev V. I. Axisymmetric elastic spherical shell. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1969, Vol.33, iss. 2, pp. 280-286. (in Russian).